

文章编号: 1007-2780(2012)04-0529-06

三维数据场在扫描式体显示器中的可视化

邢建芳¹, 龚华军^{1*}, 张赵行², 潘文平¹

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016, E-mail: xingjianf@nuaa.edu.cn;
2. 中国科学院 自动化研究所, 北京 100190)

摘 要: 基于双螺旋屏幕扫描式的体显示系统, 设计并实现了一种面向真实立体空间的三维数据场可视化方法。利用双螺旋屏幕的旋转运动扫描出均质稳定的图像空间, 渲染过程中将规则的三维离散数据场分割成一组间隔均匀的螺旋切片, 采用分层体绘制方法将这些数据切片渲染成一系列单独的切片图像。切片图像序列通过高频投影方式依次投射到图像空间, 采用多线程技术实现投影时序与屏幕运动之间的同步机制, 最终完整的三维图像被周期性地逐层扫描显示出来。实验结果表明, 该方法输出的空间图像均匀清晰, 呈现自然的立体状态, 保留了固有的三维尺度, 可以环绕显示器提供全方位的观察自由度。

关 键 词: 体显示; 三维数据场; 可视化; 逐层扫描

中图分类号: TP391.41; TN27 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/YJYXS20122704.0529

Visualization of 3D Datasets Based on Swept-Volume Display

XING Jian-fang¹, GONG Hua-jun^{1*}, ZHANG Zhao-xing², PAN Wen-ping¹

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China, E-mail: xingjianf@nuaa.edu.cn;
2. Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: Based on double-helicoid swept-volume display system, this paper proposes and implements a 3D datasets volume visualization scheme in real stereoscopic space. Homogeneous image space is created by the screen's rotational scanning. In rendering process, 3D regular discrete data is subdivided into a series of helicoid slices evenly. Then each data slice is rendered into an image frame separately. The rendered images are projected into the imaging space in rapid succession through a high-speed projector. By using multi-thread technique, synchronization between projected images sequence and screen's rotation is achieved. Finally the whole spatial image is scanned out layer by layer. The experimental results show that elements of the presented spatial images are uniformly distributed and well defined. All three dimensionalities of the images are reserved inherently; this approach offers omni-directional viewing freedom around the display.

Key words: volumetric display; 3D datasets; visualization; layered scanning

收稿日期: 2012-03-30; 修订日期: 2012-05-06
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(No. 2007AA01Z338); 中央高校基本科研业务费专项基金; 江苏省研究生科研创新计划项目(No. CX09B_083Z)
作者简介: 邢建芳(1981—), 男, 山东曲阜人, 博士研究生, 主要研究方向为三维显示、图形图像等。
* 通讯联系人, E-mail: ghj301@nuaa.edu.cn

1 引 言

三维数据场的可视化是一种通过计算机图形技术将三维数据转化成可显示的图像的过程,也称为体视化。传统三维计算机图形学中的渲染管线是面向二维光栅显示的,三维模型首先根据规定的观察坐标系投影到像平面上,然后被光栅化成像素阵列并最终显示在二维屏幕上。由于每次只能提供三维场景的单一投影,三维空间感的产生要依赖于透视、遮挡、明暗等深度线索。直接体绘制技术不借助中间几何图元,直接将三维数据场绘制在二维图像屏幕上,表现的是光线沿观察方向对数据场中颜色和不透明度的累积效果^[1]。在立体镜和多视图显示技术中还常常通过模拟视差线索来增强深度感,但是人眼的调节与辐合机能通常处在解耦状态,容易引起视觉疲劳^[2]。这些显示技术均建立在平面显示设备的前提上,不能提供真实的物理深度。

与平面显示不同,体显示技术直接在真实的三维物理空间整体再现三维图像,突破了在二维平面内显示三维场景的局限^[3]。三维图像采用体素的空间分布表示,每个体素对应物理空间内的一个固定位置。体素在各自的位置向空间发射光线,组成三维的影像体。从技术路线上划分,体三维显示主要分为静态显示和动态显示。静态体显示技术利用气态物质、水晶体、光纤集束或多层液晶板构建三维显示空间^[4-6]。动态技术基于时分复用和瞬间成像原理,利用周期运动的屏幕扫描出一个立体空间来容纳三维影像。动态扫描显示技术更易于实现,生成的图像质量高,成为体显示系统的常见类型,如 TI 公司的 OmniViewTM、德国的 FELIX 及原 Actuality Systems 公司的体显示器等^[7-9]。

本文基于采用双螺旋扫描屏幕和高速投影技术的体显示系统^[10-11],在原有工作基础上优化了扫描屏幕和光路布局,采用分层体绘制和逐层投影方法实现了一种针对体显示系统的三维数据场可视化方案。新系统提高了图像空间的均质性和图像显示质量。图像的渲染和显示独立于视点,允许多个观察者围绕显示器在全方位内自由选择视点位置,直接以裸眼即可观察到如雕塑一般的三维图像,自动满足心理和生理深度线索。

2 图像空间分析

2.1 图像空间的构建

体显示系统的图像空间是一个用于呈现三维图像的占有一定体积的真实空间。这里采用一种双叶螺旋屏幕的旋转运动来构建图像空间。双螺旋的形状是通过将单导程的螺旋面在轴线方向上等分成上下两半,然后再将两部分以中心对称的形式拼接得到。在前期工作中,文献[10]设计了带有中间支撑墙的双螺旋屏幕,整个结构仅由中心转轴支撑。后续运行中,屏面及边缘产生了翘曲变形,影响成像质量。新设计的屏幕取消了支撑墙,在上下两端分别增加了一个金属的水平支撑梁,贯穿垂直的金属转轴,形成一个工字型的架构,如图 1 所示。屏幕半径和高度均为 0.25 m,水平支撑梁和中心转轴均密实嵌套于与屏幕一体的柱形空腔内,此外屏幕边缘采用了加强筋。新屏幕结构简洁轻巧,强度更高,风阻小,转动更为稳定,更有利于构造稳定和大容积的图像空间。屏幕材质为高强度光敏树脂,表面光学特性通过打磨严格调控,具有各项同性的漫反射特性,透光度在 50% 左右。在伺服系统的控制下,屏幕匀速旋转,当转动频率达到人眼闪光融合频率的要求时,便扫描出一个密度均匀的半透明圆柱体状图像空间。

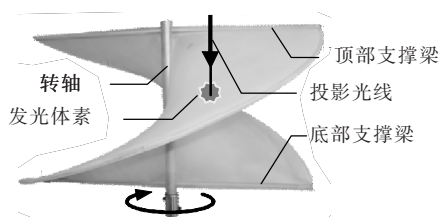


图 1 双螺旋屏幕

Fig. 1 Double-helicoid screen

为了增加空间利用率,新设计在屏幕转轴上方布置投影装置。投影光线与瞬间扫过的屏幕相交形成可见光点并向四周散射,这些光点作为三维图像的基本单元即体素。每个体素都是光可寻址的,具有惟一的空间坐标 (x, y, z) ,取决于光线与屏幕的交点。可以用一个简单的光线发射模型描述体素所发射光线的变化:

$$dI/ds = g(s) \quad (1)$$

式中, I 为光线强度, s 为光线发射方向的长度参数, $g(s)$ 为光源项。

相对于主动发光屏幕,投影成像方式使屏幕与光源及电子设备分离,提高了系统运行的可靠性,同时降低了图像分辨率对屏幕尺寸的依赖,图像细节表达能力强。

2.2 图像空间的体素容量

屏幕每旋转一周三维图像完成一次刷新。设图像空间的最大体素容量或体分辨率为 N_a , N_a 越大表示生成高分辨率三维图像的能力越强。 N_a 可以用式(2)来计算:

$$N_a = (T/T_{\text{act}}) \cdot P = K \cdot P \quad (2)$$

式中 T 为图像的刷新周期, T_{act} 为生成单个体素所用的时间,依赖于光调制器的响应时间。 P 为寻址带宽,即每次生成的体素数量,取决于寻址光线的数量。令 $K = T/T_{\text{act}}$, 为生成所有体素所需要的扫描次数。

要生成视觉上连续稳定的高分辨率三维图像,需要减小 T 即提高屏幕转速,实验表明当转速达到 600 r/min 时,基本可以满足人眼闪光融合的要求。在 T 与 P 一定时则需要降低 T_{act} 来提高 N_a , 但往往受限于光调制器的性能。这种矛盾在早期的体显示系统中比较明显,它们多以振镜或声光扫描器件调制单束激光以矢量化的方式生成体素。这种情况下每次仅生成一个体素即 $P=1$, 并且每生成一个体素均需要获取一次屏幕的位置信息,在一定程度上增加了运行时间。提高 N_a 的另一个有效途径是增大 P , 即增强体素寻址的并行性。随着以数字微镜器件(Digital Micro-Mirror Device, DMD)为核心的数字光处理技术的发展,高速并行光寻址技术开始应用在体显示系统中。DMD 采用数百万个可独立控制的精微镜面将投影光源分解成二维光线阵列,光线调制速度非常快,在加载 1 bit 位图的情况下,可达到上万的帧率,同时具有足够的光强度,能够满足高频投影立体显示的需求。本文中采用一片 0.7 XGA 型 DMD 结合光学部件搭建高速投影装置,光线寻址带宽 $P=1\,024 \times 768$, K 值可达 $10^2 \sim 10^3$ 。在这种情况下,三维图像可以光栅化的方式在一个刷新周期内分 K 次逐层投影显示出来,投影帧率 $F=K/T$ 。

3 三维数据的渲染与显示

3.1 三维数据渲染

体显示器具备一个由体素作为基本显示单元

的三维图像空间,因此十分适合直接显示三维体数据集。三维数据可以通过仿真计算或对实际物体三维测量获得。传统的三维造型方法采用多边形网格来逼近物体表面,不适合进行直接体显示,要首先对表面进行点采样转换成离散体数据形式^[12]。这里讨论的三维数据场均为规则的标量场,数据分布在三维笛卡尔栅格中,3 个轴向上的采样间隔分别相等。

在平面显示中,直接体绘制是显示三维数据场的常用方法。它假设数据场存在于一种充满有色、半透明媒介的空间中,利用光学模型模拟计算穿越数据场的光线到达像平面后的强度值。整个数据场最后合成在二维屏幕上,观察参数改变时,图像需要重新计算。体显示与体绘制的概念有些类似,不同在于体显示系统直接提供了一个真实的三维显示环境,信息最终直接以三维的影像形态传达到视觉系统。就硬件上来说,在一个静态的实体空间内利用显示技术“雕刻”出三维图像尚有一定难度。在动态扫描式的体显示技术中,三维图像可由分时投影到屏幕上的各个数据层的图像“堆叠”而成。

屏幕在匀速旋转扫描过程中,每个瞬间穿越一层区域,称为图像空间的一个图层。对应一个周期内的 K 个等间隔时刻,定义 K 层均匀分布的离散图层,按自下而上的顺序标记为 $0, 1, \dots, K-1$ 。相邻图层在 z 方向上的间距为 $\Delta z = H/K$, 其中 H 为屏幕的高度。当屏幕静止在起始位置时,建立如图 2 所示的坐标系。实际有效的图像空间是圆柱体内的内接立方体,在 x - y 剖面内的分辨率为 $1\,024 \times 768$, 与投影设备的 DMD 分辨率一致。设 i, j 分别为体素在图像空间 x, y 方向上的索引, $i=0, 1, \dots, 1\,023, j=0, 1, \dots, 767; x_i, y_j$ 分别为对应的物理坐标值, $x_i, y_j \in [-R, R]$, R 为屏幕半径。由于图层是双螺旋状的空间曲面,第 0 个图层上坐标为 (i, j) 的体素的高度值 z 可表示为:

$$z_0(i, j) = \begin{cases} \frac{H}{\pi} \times \left[\frac{\pi}{2} - \text{atan}(y_j, x_i) \right], & x_i \geq 0 \\ \frac{H}{\pi} \times \left[\frac{\pi}{2} + \text{atan2}(y_i, -x_i) \right], & x_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\text{atan2}(y, x)$ 是 C++ 中用于求反正切值的函数,返回值为 $[-\pi, \pi]$ 。

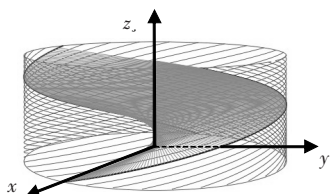


图 2 图像空间的坐标系

Fig. 2 Coordinate system of the image space

假设投影光线平行于 z 轴,当屏幕顺时针转动时,每经过一个图层, (i, j) 对应的 z 值便增加 Δz ,因此后续各图层上体素的 z 值可以用增量的方法计算:

$$z_K(i, j) = z_{k-1}(i, j) + \Delta z \quad (4)$$

式中, $k = 1, 2, \dots, K-1$ 。

定义好 K 个图层之后,通过平移和缩放将三维数据场从物体空间变换到图像空间,使得这些图层切入数据场,如图 3 所示。用这些图层对数据场重采样,可得到一系列体数据的切片。采用简单的最邻近方法,通过 3 个独立的一维搜索将体数据匹配到距离最近的图层上。搜索按照体数据的存储顺序,依次对与图像相关的每个数据点展开。设当前数据点在图像空间的物理坐标为 (x, y, z) ,图像空间内的体素点坐标为 (x_i, y_j, z_k) 。首先沿图像空间的 x 方向搜索,计算该数据点与各体素在 x 方向的距离 $|x - x_i|$,从而找到在 x 方向上距离数据点最近的体素集,索引记为 s 。然后沿 y 方向计算 $|y - y_j|$,找到在 y 方向上距离当前数据点最近的体素集,索引记为 t 。由此可以将数据点在 $x-y$ 剖面的投影坐标近似为 (x_s, y_t) ,根据式(3)及(4)可以得到该坐标点在各图层上的高度值 $z_k(s, t)$,将数据点的 z 值与这些高度值相比较,确定与数据点最邻近的图层 r 。最后得到数据点在图像空间中逻辑坐标 (s, t, r) 。

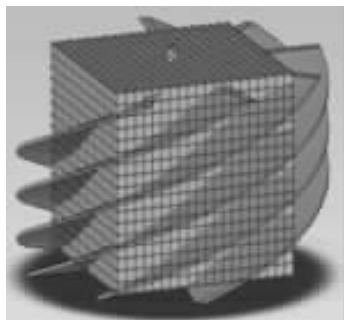


图 3 数据体的分层

Fig. 3 Slicing of the data cube

接下来对应每层数据切片,共定义 K 个垂直于 z 轴的像平面,将每层切片的体数据分别绘制成相应的切片图像。采用物体空间扫描的体绘制技术,依次处理每层切片,切片之间相互独立,每层体数据仅对编号相同的切片图像有贡献。从数据切片出发沿 z 轴向像平面做平行投影,图像的合成可以借助足迹表的方法完成。在平行投影时,每个数据点重构核的空间卷积域在 $x-y$ 像平面上的投影都是相同的,因此只需进行一次足迹表的计算,所得结果用于计算每一个体数据对图像的贡献。在这里投影方向与实际的观察方向无关,图像的计算不依赖于特定的视点,因为最终的显示结果容纳于具有透明性的实体空间内,在各个方向上均是可见的。

图层数 K 的选取要综合考虑数据规模、切片图像格式和 DMD 的开关速度,图层过密容易形成空白切片,过疏则会使高度偏差过大。实际中一般使 Δz 与体素的长、宽值相近, K 值一般在 100~200 之间。另外,考虑到螺旋屏幕在转轴附近的法线与实际投影光线的夹角接近垂直,会造成体素点的过度拉伸变形,因此最好在预处理阶段先将数据平移到转轴的一侧,以避免变形区域。

3.2 三维图像显示

体显示可以看作是绘制的逆过程,即将绘制好的切片图像序列逐层轮流投影显示在对应的图层上,依靠人眼的闪光融合能力,高频投影的切片图像被感知成连续的三维图像。投影设备采用专用的 DMD 控制模块 ALP-3 (ViALUX Inc.) 驱动,绘制好的切片图像序列发送到 ALP-3 并缓存在其 RAM 中。因为屏幕是在瞬间穿越各个图层的,因此关键是对切片图像序列的显示施以准确的时序控制,使流经 DMD 的图像数据与屏幕运动保持同步切换。

由式(2)可计算出每幅切片图像在对应图层上的显示时间 $T_{\text{act}} = T/K$,一般为几百个微秒,通过软件将 T_{act} 写入到 ALP-3 的控制参数中。每个体刷新周期内的切片图像序列受一个零位信号的触发。屏幕伺服系统的旋转编码器在每个旋转周期产生一个 Z 相脉冲,调整该信号使其发生在屏幕的零位置处,每个周期采集一次并将其反馈到主机作为投影触发信号。为了避免零位信号的漏采,程序中设置了两个线程,主线程用于图像数据的接收、存储和属性设置等,另一线程用于零

位信号的侦听。两个线程之间利用互斥量 Mutex 实现同步。当侦听到零位信号时,按照设定的时序开启切片图像序列的投影,如此循环。

4 实验结果及讨论

对上述三维数据场的可视化方法在自行研制的体显示系统上进行了验证。设备如图 4 所示,图像空间外部安装了透明防护罩。



图 4 体显示系统样机
Fig. 4 Volumetric display prototype

事先调整光路,将高速投影装置固定在图像空间上方合适的距离处,光源为单色白光。屏幕转速范围设置在 600~1 200 r/min,对应的体图像刷新率为 10~20 Hz。因为光线从正面投射和现有屏幕良好的辉光特性,相对于原系统,图像亮度明显提高,实验可以在自然光照环境下进行。采用分层体绘制方法得到的切片图像分辨率为 1 024×768,图层数为 132,显示效果更加清晰细腻,无颗粒感。三维图像具备可度量的体积,可视为一个自然发光物体。在面对体显示器时,观察者的双眼会自动看到两幅略有差别的视图;当观察者环绕显示器改变位置时,观察到的视图也会自然变化,具备平滑的运动视差。观察过程中不需要任何辅助设备如立体眼镜、头部跟踪装置等。人眼晶状体的调节和双眼辐合等生理机制处于协调的工作状态,不会引起视觉疲劳。图 5 为一组体显示器中三维图像的照片。图 5(a)是一幅分子模型三维影像的照片,图 5(b)是人体腹腔影像的照片。图 5(c)、(d)分别是不同角度的同一个三维影像的两幅照片,显示的是通过结构光测量得到的人面部的三维数据。

相对于观察者或相机,组成三维图像的体素

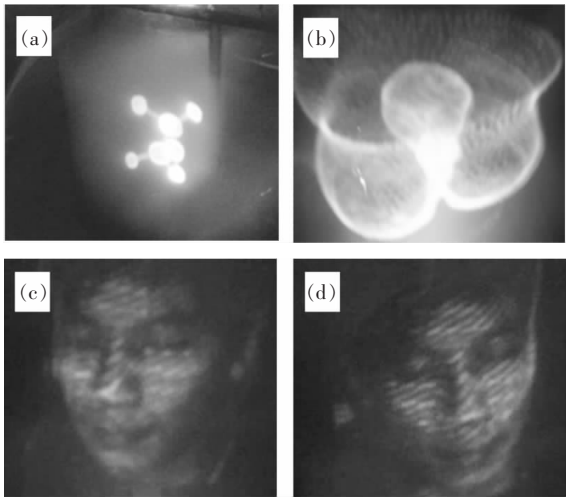


图 5 三维图像的显示效果照片。(a)分子模型;(b)人体腹腔;(c)人面部右侧视图;(d)人面部左侧视图。
Fig. 5 Photographs of the 3D images. (a) Molecular model; (b) Abdominal cavity; (c) Right side view of human face; (d) Left side view of human face.

在空间中的不同深度向周围发射光线,人眼观察或相机拍摄到的图像是这些光线直接在视网膜或底片上成像的结果。根据公式(1),这可看作是在观察方向上自然发生的积分过程。由于图像空间的构建方式和体素的生成方式,体显示器中的三维图像具备一定的透明度,因此数据场的内部细节也可以被观察到,如图 5(b)所显示的效果。但这种特性也使得隐藏面消除在体显示器上不能得到很好的支持。

5 结 论

在双螺旋屏幕旋转扫描式的体显示系统基础上,提出并实现了一种三维数据场的空间可视化方法。实验结果表明,三维图像可以直接再现于自然的三维空间内,显示内容独立于视点,可实现三维图像的全方位自由观察。目前系统仅支持单色灰度显示,下一步将深入完善系统硬件和软件算法,实现彩色三维图像的显示。体显示技术为实现真正意义上的体视化提供了理想的支持,有望成为医学影像、计算机辅助设计、地质勘探及科学计算等可视化应用领域的一种解决方案。

参 考 文 献:

- [1] 唐泽圣. 三维数据场可视化 [M]. 北京:清华大学出版社,1999: 28-45.
- [2] Lambooi M, IJsselsteijn W. Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays; a review [J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2009, 53(3):3-12.
- [3] Blundell B, Schwarz A. *Volumetric three dimensional display systems* [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2000:3-18.
- [4] Kim I, Korcvaar E, Hakakha H. Three-dimensional volumetric display in rubidium vapor [C] // *Proc. of SPIE*, USA: SPIE, 1996, 2650:274-284.
- [5] Sullivan A. DepthCube solid-state 3D volumetric display [C] // *Proc. of the SPIE*, 5291, USA: SPIE, 2004, 5291:279-284.
- [6] 冯奇斌,王小丽,吕国强,等. 固态体积式真三维立体显示器的色度学特性 [J]. 液晶与显示,2011,26(1):100-103.
- [7] Clifton III T E, Wefer F L. Direct volume display devices [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1993, 13(3): 57-65.
- [8] Bahr D, Langhans K, Gerken M, *et al.* FELIX: A volumetric 3D laser display [C] // *Proc. of SPIE*, 2650, USA: SPIE, 1996, 2650:265-273.
- [9] Favalora G, Dorval R, Hall D. Volumetric three-dimensional display system with rasterization hardware [C] // *Proc. of the SPIE*, 4297A, USA: SPIE, 2001, 4297:1-8.
- [10] 樊琼剑,李莉,沈春林,等. 体三维成像的螺旋扫描系统设[J]. 光学 精密工程,2010,18(1):183-189.
- [11] Xing J, Gong H, Li L, *et al.* A highly parallel beam-addressed true three-dimensional volumetric display system [C] // *Proc. of 2010 Symposium on Photonics and Optoelectronics*, Piscataway, USA: IEEE Computer Society, 2010:1-5.
- [12] Jones M. The production of volume data from triangular meshes using voxelization [J]. *Computer Graphics Forum*, 1996, 15(5):311-318.